

タイトル	3次元有限要素法による声道音響特性の検討：声道の分岐および口唇部突き出しの影響
著者	松崎，博季；元木，邦俊；三木，信弘
引用	北海学園大学工学部研究報告，31：123-134
発行日	2004-02-20

# 3次元有限要素法による声道音響特性の検討 —声道の分岐および口唇部突き出しの影響—

松崎 博季\*・元木 邦俊\*・三木 信弘†

## A Study of Acoustic Characteristics of the Vocal Tract by 3-D Finite Element Method:

Influences of the Branches and the Lips of the Vocal Tract

Hiroki MATSUZAKI\*, Kunitoshi MOTOKI\* and Nobuhiro MIKI†

### あらまし

口唇部突出し、梨状窩および喉頭蓋谷の音響特性に与える影響を調べるために、有限要素法を用いて3次元声道形状モデル内の音響特性のシミュレーションを行った。オリジナルの声道形状モデルと、口唇部突出し、梨状窩あるいは喉頭蓋谷の省略を行ったモデルの声道伝達特性を計算し、比較、検討を行った。オリジナル声道形状モデルを母音/a/発声時のMRIデータを使用して作成した。実験結果より、第3ホルマント周波数より高域では分岐による、あるいは分岐の省略による零点やピークが生じることが示された。この周波数領域では口唇部突出しの影響はほとんど現れなかった。第1～3ホルマント周波数の範囲では口唇部突出しや分岐は、各部位の存在と干渉することなく独立して各ホルマントを移動させることが示された。

キーワード：有限要素法，3次元声道形状モデル，声道伝達特性，口唇部突出し，梨状窩，喉頭蓋谷

---

\* 北海学園大学工学部電子情報工学科

\* Department of Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

\* E-mail: {matsu, motoki}@eli.hokkai-s-u.ac.jp

† 公立はこだて未来大学

† Future University-Hakodate

† miki@fun.ac.jp

### Abstract

To investigate influences of the protrusion of the lips and the short branches of the pyriform fossa and the valleculla, acoustic characteristics of three-dimensional geometrical vocal tract models were simulated by finite element method. The vocal tract transfer functions of an original vocal tract geometrical model and simplified models, which were constructed without the lips and/or the branches, are computed. The original model was made for Japanese vowel /a/ based on MRI data. The results showed that the branches and omission of the branches contribute to the appearance of zeros and/or peaks of the vocal tract transfer functions, and the lips have little influence on the acoustic characteristics above the third formant frequency. It is also suggested that the lips and the branches affect independently to the shifts of the first 3 formant frequencies.

**Key words** : Finite element method, three-dimensional vocal tract geometrical model, vocal tract transfer function, protrusion of the lips, the pyriform fossa, the valleculla

## 1. はじめに

3次元声道形状モデルを用いた声道の分岐や口唇部突出し形状の音響特性に与える影響の検討が行われている [1-6]。これらの研究では、声道の一部分のみを対象とした、あるいは簡略化された形状モデルが用いられていた。本稿では口唇部突出しを含めた日本語母音/a/に対する3次元声道形状モデルを簡単な形状で簡略化することなしに作成し、有限要素法(FEM)によりモデル内の音響特性のシミュレーションを行った結果を報告する。このモデルをオリジナル・モデルとして、オリジナル・モデルから口唇部の突出し、あるいは分岐としての梨状窩や喉頭蓋谷を省略したモデルを作成し、同様にシミュレーションを行う。声道伝達特性を求めオリジナル・モデルの伝達特性との比較を行うことで、口唇部の突出しや分岐の音響特性に与える影響を調べる。3次元声道形状モデル作成のための基礎データとして、成人男性1話者が日本語母音/a/を発声した時のMRIにより撮像された矢状断面画像を利用する。矢状断面画像から視察により抽出された12の声道輪郭線 [7,8] をもとに NURBS modeling ソフトウェアを使用して108面の声道横断面を求め、これらを有限要素メッシュで分割、補間する形で3次元声道形状モデルを作成する。口唇部の放射端を閉じた曲線を描ける最終部分の声道横断面とし、ここに3次元の放射を模擬するための放射空間 [9] を設ける。口唇部突出しの省略部位は、この放射端より突出した部分とする。梨状窩の省略部位は、同一平面上にある声道横断面が複数になる部分とする。喉頭蓋谷の省略については、各声道輪郭線から喉頭蓋谷と思われる部分を

NURBS 曲線を利用して省略し、修正した声道輪郭線から声道横断面を新たに求め、3次元声道形状モデルを再構築することで行う。

実験結果より、第3ホルマント周波数より高域(8 kHz まで)では分岐としての梨状窩や喉頭蓋谷による零点が生じることはもちろん、これらの分岐の省略によりピークのみならず零点も生じること、ならびに4 kHz 付近に存在する零点の移動と思われる現象が示される。この周波数領域では口唇部突出しの影響はほとんど現れないことが示される。第1~3ホルマント周波数の範囲では口唇部突出しや分岐の影響が現れるのは第1および第2ホルマントまでで、第3ホルマントではそれらの影響はわずかであることが示される。口唇部突出しの音響的な延長効果が物理的な延長分よりも少ないことも示される。さらに、口唇部突出し、梨状窩および喉頭蓋谷がほとんど他の部位と干渉することなくほぼ独立して各ホルマントを移動させることが示唆される。

## 2. 実験概要

口唇部突出しを含めた日本語母音/a/発声時の3次元声道形状モデル、ならびに口唇部突出しや分岐を省略したモデルを作成し、FEMでこれらのモデル内の音響特性を求める。

### 2.1 基礎方程式

使用した基礎方程式は、次式に示す速度ポテンシャル $\phi$ の定常状態における波動方程式である。

$$\nabla^2\phi = k^2\phi$$

ここで $k$ は波数である。上記の方程式をFEMに適用して使用する。

### 2.2 3次元声道形状モデルの構築

声道の3次元形状データとして、成人男性1話者が日本語母音/a/を発声した時のMRIにより撮像された矢状断面画像から抽出された12の声道輪郭線[7,8]を使用した。これらの声道輪郭線から108面の声道横断面を視察によりNURBS modelingソフトウェアであるRhinoeros (AppliCraft社)を使用して求めた。壁直交性に優れたメッシュを作成できる流体解析用メッシュジェネレータGridgen (Pointwise社製)を利用して、まず、これらの声道横断面の有限要素メッシュを構造格子(4角形要素)で作成した。これらの有限要素メッシュをHyperMesh (Altair Engineering社製)に取り込み、節点情報などの変更を行い、各断面間を補間することにより3次元声道モデルを構築した。使用した有限要素は6面体1次要素である。口唇

部の放射端を，声道横断面を求める際に閉じた曲線を描ける最終部分とした。駆動面（声帯）の位置を決定するのは困難であるが，ここでは声帯と思われる部分を視察により駆動面とした。声道壁は全て剛壁であると仮定した。放射端には3次元の放射を模擬するための半径4 cmの放射空間 [9] を設けた。

作成された有限要素メッシュを放射空間のバッフル面を含めて図1に示す。これをオリジナル・モデルと呼ぶことにする。このオリジナル・モデルから以下に示す口唇部突出しや分岐を省略したモデルを作成した。

1. 口唇部突出し，梨状窩および喉頭蓋谷を省略したモデル (model without the lips, the pyriform fossa and the vallecula, WoLPV と略記)
2. 口唇部突出しのみを省略したモデル (model without the lips, WoL と略記)
3. 梨状窩および喉頭蓋谷を省略したモデル (model without the pyriform fossa and the vallecula, WoPV と略記)
4. 梨状窩のみを省略したモデル (model without the pyriform fossa, WoP と略記)
5. 喉頭蓋谷のみを省略したモデル (model without the vallecula, WoV と略記)

WoLPVの有限要素メッシュを図2に示す。口唇部突出しの省略については，図2に示すように，放射端より放射空間側にある部分を省略することで行った。梨状窩の省略については，図

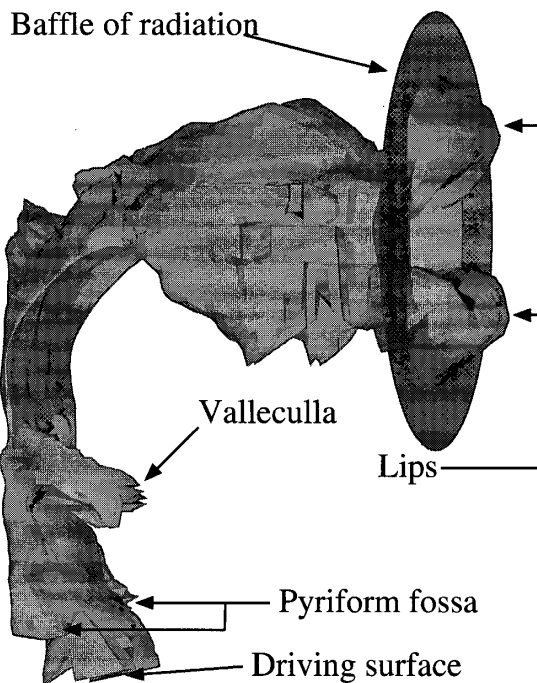


図1 オリジナル・モデルの有限要素メッシュ

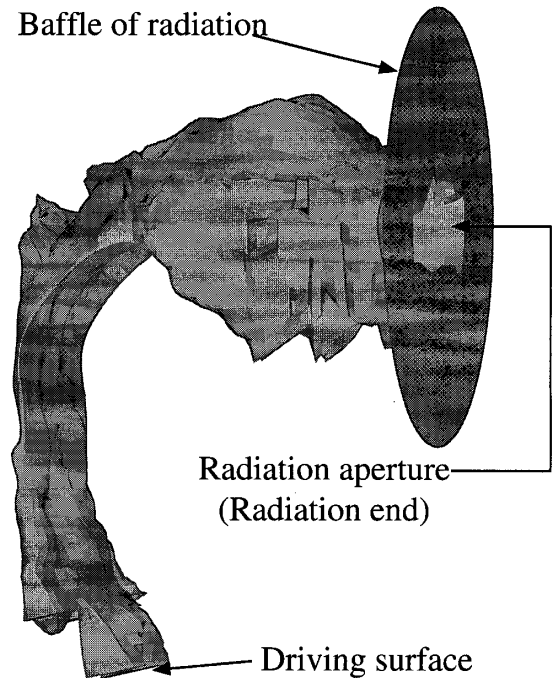


図2 オリジナル・モデルから口唇部突出しと分岐を省略したモデルの有限要素メッシュ

3に示すように、同一平面上にある声道横断面が複数になる部分を単純に省略することで行った。喉頭蓋谷の省略については、図4に示すように、元の矢状断面データから分岐部と思われる部分をNURBS曲線を利用して省略した新たな矢状断面データを作成し、このデータから声道横断面を新たに再構築することで省略を行った。

表1に各モデルの有限要素メッシュの節点数ならびに要素数を示す。

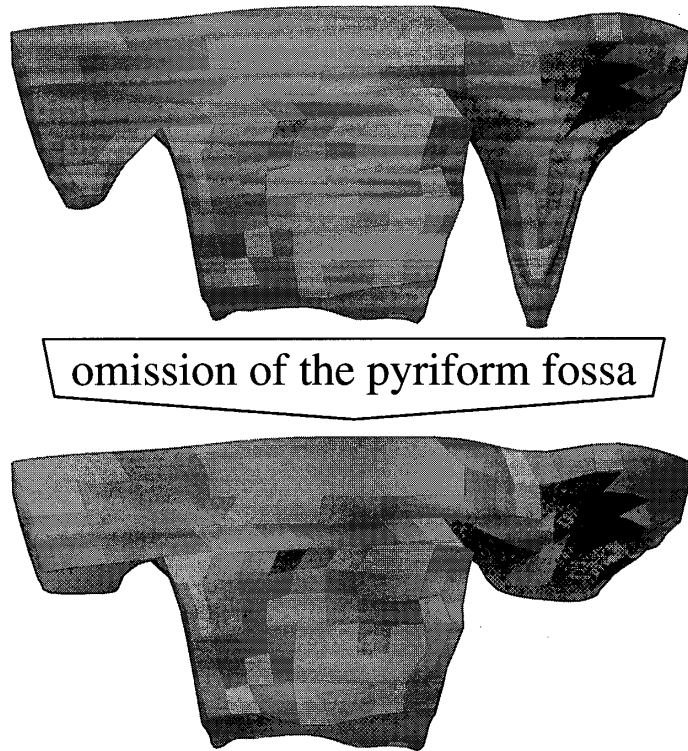


図3 梨状窩省略の一例

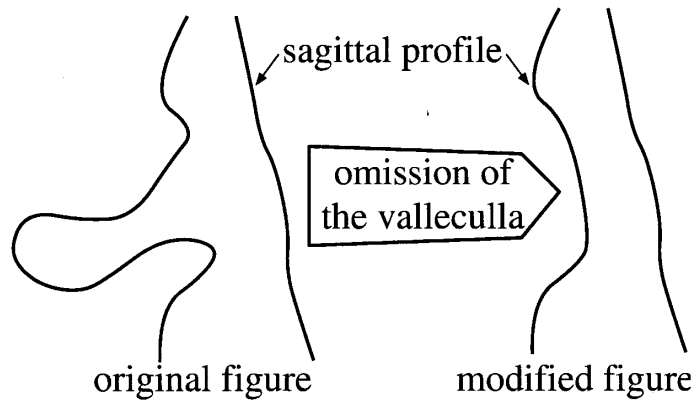


図4 喉頭蓋谷省略の一例

表1 有限要素メッシュの節点数と要素数

	Original model	Omission models				
		WoLPV	WoL	WoPV	WoP	WoV
node	64609	61972	64936	61645	63069	631853
element	57386	55565	57872	55079	56056	56409

### 3. 声道伝達特性の比較

FEMにより8 kHzまでの各モデル内の音圧および粒子速度を10 Hz毎に、ピークや零点の周辺部分のみ1 Hz毎に計算し、その結果を元に声道伝達特性 $H_v(\omega)$ を求めた。オリジナル・モデルの声道伝達特性を基準として、他の省略を施されたモデルの声道伝達特性との比較を行う。

$H_v(\omega)$ の計算には、次式を用いた。

$$H_v(\omega) = 20 \log_{10} \left| \frac{\frac{A_r}{n_r} \sum_{j=1}^{n_r} v_{r,j}(\omega)}{\frac{A_d}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} v_{d,i}(\omega)} \right| \quad (1)$$

ここで、 $\omega$ は角周波数、 $n_d$ および $n_r$ は駆動面と放射端の節点数、 $v_{d,i}(\omega)$ および $v_{r,j}(\omega)$ は駆動面と放射端の断面上の粒子速度の垂直方向成分である。また、 $A_d$ および $A_r$ は駆動面と放射端の断面積である。

#### 3.1 放射空間内の口唇部突出しの影響について

口唇部突出しが放射空間内に存在するため、放射空間の体積が減少し放射空間内の共振特性に影響を及ぼす可能性がある。そこで、オリジナル・モデルと他の省略を施されたモデルの声道伝達特性の比較を行う前に、放射空間の大きさが変わることで得られる結果に差異が生じるのかどうかを検討する。

オリジナル・モデルの放射空間の半径を5 cmに変更して計算し、これを半径が4 cmの場合の声道伝達特性と比較した結果を図5に示す。実線が半径4 cm、破線が半径5 cmの場合の声道伝達特性である。なお、4 cmの場合を基準とすると、半径で25%、体積で口唇部突出しを除けば約95%増となる。図5を見る限りにおいては、全周波数領域にわたって両者はほとんど一致している。第1～3ホルマント周波数は半径4 cmの場合、627, 1175, 2641 Hzであるのに対し、半径5 cmの場合、628, 1178, 2643 Hzである。両者の値が完全に一致していないの

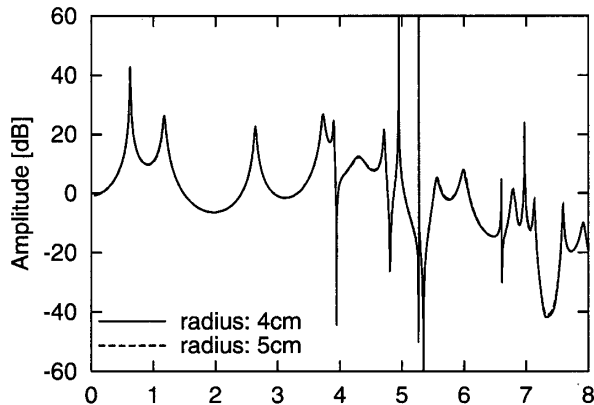


図5 放射空間の半径が4 cmと5 cmの場合の声道伝達特性の比較

で口唇部突出しの影響が全くないとは言えないが、いずれも2, 3 Hz程度の差であるので、この影響を無視しても問題ないのではないかとと思われる。

### 3.2 オリジナル・モデルと他の省略を施されたモデルの声道伝達特性の比較

図6に、上段から下段へ順に、WoLPV, WoL, WoPV, WoPおよびWoVの声道伝達特性を、オリジナル・モデルのものと比較した図を示す。いずれも実線がオリジナル・モデル、破線が各省略モデルの声道伝達特性である。まず、第3ホルマント周波数より高域について比較、検討してみる。オリジナル・モデルの声道伝達特性の3948 Hzに見られる極めて帯域幅の狭い零点が、WoLPVとWoPVの場合272 Hz, WoPの場合177 Hz, WoVの場合53 Hz, 高域側に移動しているのに対して、WoLでは全く移動していない。オリジナル・モデルの声道伝達特性の4810 Hzに見られる零点については、他のどの省略モデルにおいてもほぼ同一周波数に存在している。従って、この零点は本稿で省略した部位以外の部分によってもたらされたものであると思われる。オリジナル・モデルの声道伝達特性の4949 Hzに見られる極めて帯域幅の狭いピークについては、喉頭蓋谷を省略したモデルであるWoLPV, WoPVならびにWoVでは見られないのに対して、他のモデルではほぼ同一周波数に存在している。従って、このピークは喉頭蓋谷によってもたらされたものであると思われる。オリジナル・モデルの声道伝達特性の5267 Hzと5276 Hzに見られる極めて帯域幅の狭い零点とピークの対は、WoL以外の他のモデルでは見られない、あるいはWoPでその周波数においてわずかに変化が認められる程度である。従ってこのピークと零点の対は喉頭蓋谷、あるいは喉頭蓋谷と梨状窩によってもたらされたものであると思われる。オリジナル・モデルの声道伝達特性の5345 Hzに見られる零点については、喉頭蓋谷を省略したモデルであるWoLPV, WoPVならびにWoVでは見られず、ピークが生じているのに対して、他のモデルではほぼ同一周波数に存在している。従って、このピークは喉頭蓋谷によってもたらされたものであると思われる。この結果は、分岐を省略することにより本来存在しないはずのピークを生じさせる可能性のあることを示唆している。なお、



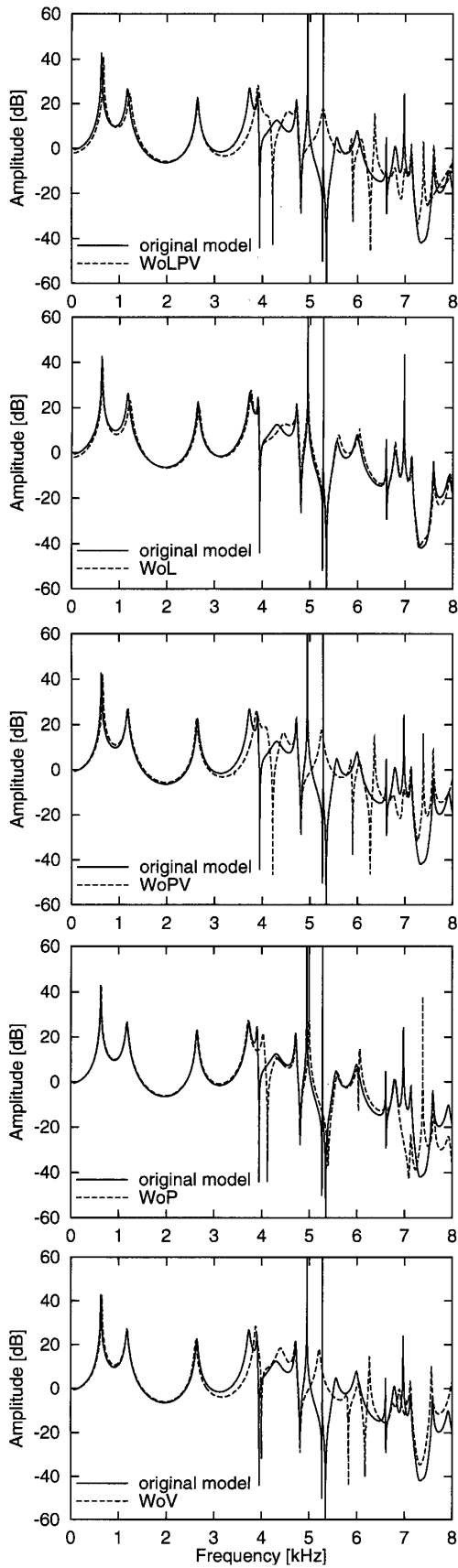


図6 オリジナル・モデルと各省略モデルの声道伝達特性の比較

5345 Hz から 1/4 波長を求めると約 16.5 mm となり、これが喉頭蓋谷の一部分の長さに相当すると思われる。梨状窩あるいは喉頭蓋谷を省略したモデルの声道伝達特性の 6 kHz 前後にはオリジナル・モデルには無い零点が見られる。この結果は、分岐を省略することにより本来存在しないはずの零点をも生じさせる可能性があることを示唆している。オリジナル・モデルの声道伝達特性の 7330 Hz に見られる帯域幅の広い零点については、梨状窩を省略したモデルである WoLPV, WoPV ならびに WoP では見られず、この周波数付近においてピークが生じているのに対して、他のモデルではほぼ同一周波数に存在している。従って、この零点は梨状窩よってもたらされたものであると思われる。なお、7330 Hz から 1/4 波長を求めると約 12.0 mm となり、これが梨状窩の一部分の長さに相当すると思われる。一方、党あるいは中井らの報告によれば、梨状窩による零点は 4 kHz 近傍にあると報告されている[1,2,4]。本稿で示した声道モデルの梨状窩による零点が 7330 Hz にあるのは、党あるいは中井らのモデルのものよりも梨状窩が短いためであると思われる。

WoL の声道伝達特性は第 3 ホルマント周波数以上の高域で、オリジナル・モデルのものと大きな差がなくほとんど一致している。また、この周波数領域における口唇部突出しの省略の影響がほとんど見られないことも関係してか、WoLPV の声道伝達特性はほとんど WoPV のものと同じになっている。この周波数領域では、本稿で使用したモデルにおいては、口唇部突出しは省略しても問題がなく、分岐を省略することには問題があると思われる。

次に、第 1～3 ホルマントについて比較、検討してみる。表 2 は第 1～3 ホルマント周波数 [Hz] および、オリジナル・モデルのホルマント周波数を基準としたときの、各省略したモデルのホルマント周波数の変化率を示したものである。ホルマント周波数の変化率の計算には以下の式を用いた。

$$\frac{f - f_{\text{orig}}}{f_{\text{orig}}} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $f_{\text{orig}}$  はオリジナル・モデルの、 $f$  はその他のモデルのホルマント周波数である。第 1 ホルマントにおいて最も変化率が大きいのは WoLPV で、次いで WoPV, WoV となっており、

表 2 ホルマント周波数 [Hz] および変化率 (変化率は括弧内に表示)

	Original model	Omission models				
		WoLPV	WoL	WoPV	WoP	WoV
1st	627	666 (6.2)	638 (1.8)	654 (4.3)	634 (1.1)	656 (3.0)
2nd	1175	1221 (3.9)	1217 (3.6)	1181 (0.5)	1180 (0.4)	1175 (0.0)
3rd	2641	2645 (0.2)	2662 (0.8)	2624 (-0.6)	2649 (0.3)	2618 (-0.9)

本稿で示したモデルにおいては、第1ホルマントに対する影響は口唇部突出しよりも分岐の方が大きいという結果となった。第2ホルマントにおいて最も変化率が大きいのはWoLPVで、次いでWoLとなっている。その他はいずれも1%未満であるので、第2ホルマントに対する影響を与える主要な部位は口唇部突出しという結果となった。第3ホルマントにおいて最も変化率が大きいのはWoVの-0.9%であるが、いずれも1%未満である。

WoLPVの第1ホルマントを除けば、いずれも変化率は5%以内に収まっている。ところで、文献[10]によれば、多くの研究で第1、第2ホルマント周波数の移動による丁度可知差異(just noticeable difference, jnd)はほぼ1から5%程度であることが示されている。仮に5%未満の変化率では差異が感じられないとすると、WoLPV以外では差異が感じられないということになる。

ところで、表2のWoLのデータからも明らかなように、口唇部突出しの延長分の影響が最大でも第2ホルマントの3.6%となっている。オリジナル・モデルの声道長はほぼ15.4 cmであり[11]、口唇部突出しの放射端から垂直方向への最長部の長さは約12.3 mmであるので、オリジナル・モデルの声道長を基準とすると、口唇部突出しの延長分は約7.3%となる。もちろん、口唇部突出し全てが12.3 mmであるわけではないので、実際の延長効果は7.3%よりも小さいと思われるが、本稿で示された口唇部突出しの影響は最大でもその半分にも満たないことになる。この口唇の物理的な突き出し距離よりも音響的な長さが短く見えるという同様の結果は、計測実験でも得られている[12,13]。口唇部突出しの延長効果には口唇部形状のみならず、開口面積も関与していると考えられる。開口面積の小さい/i/,あるいは口唇部突出しの著しい/u/などでシミュレーションを行い、その影響について調べる必要がある。

表2の各モデルの変化率の関係をしてみると、いずれのホルマントにおいても、WoPVの変化率はWoPとWoVを足し合わせた値にほぼ等しくなっており、さらにWoLPVの変化率はWoLとWoPVを足し合わせた値にほぼ等しくなっている。このことは第3ホルマント周波数程度までは、各部位が他とほとんど干渉することなくほぼ独立して音響特性に影響を与えていることを示していると思われる。

#### 4. ま と め

口唇部突出しを含めた日本語母音/a/に対する3次元声道形状モデルを簡単な形状で簡略化することなしに作成し、さらにこのモデルから口唇部の突出し、あるいは分岐としての梨状窩や喉頭蓋谷を省略したモデルを作成し、FEMにより各モデルの声道伝達特性を求めて比較を行うことで、口唇部の突出しや分岐の音響特性に与える影響を調べた結果を報告した。

第3ホルマント周波数より高域(8 kHzまで)では以下に示す結果が得られた。

1. 梨状窩と喉頭蓋谷の省略により, 4 kHz 付近の零点の移動と思われる現象が見られた。
2. 4810 Hz の零点が, 梨状窩と喉頭蓋谷を省略した場合にもおいても見られたことから, これらの分岐以外にも声道の他の部位が分岐としての役割を果たしているものと思われる。
3. 梨状窩や喉頭蓋谷の省略により, オリジナル・モデルには見られないピークのみならず零点も現れた。
4. 喉頭蓋谷によるものと思われる極めて帯域幅の狭いピークが 4949 Hz に見られた。
5. 喉頭蓋谷, あるいは喉頭蓋谷と梨状窩によってもたらされたものであると思われる極めて帯域幅の狭い零点とピークの対がそれぞれ 5267 Hz と 5276 Hz に見られた。
6. 喉頭蓋谷によるものと思われる零点が 5345 Hz に見られた。
7. 梨状窩によるものと思われる零点が 7330 Hz に見られた。
8. 口唇部突出しの影響はこの周波数領域ではほとんど見られなかった。

第 1 ~ 3 ホルマント周波数の範囲では以下に示す結果が得られた。

1. 口唇部突出しや分岐の影響が現れるのは第 1 および第 2 ホルマントまでで, 第 3 ホルマントではそれらの影響はわずかであった。丁度可知差異を 5% 以上とすると, これらの影響が現れるのは第 1 ホルマントのみであった。
2. 口唇部突出しの音響的な延長効果は物理的な延長分よりも少なかった。
3. 口唇部突出し, 梨状窩および喉頭蓋谷がほとんど他の部位と干渉することなくほぼ独立して各ホルマントを移動させることを示唆する結果が示された。

今後は, 他の日本語母音について同様の実験を行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は, 北海学園大学ハイテク・リサーチ・センター・プロジェクト “言語情報処理研究” 及び CREST/JST “発声力学に基づくタスクプランニング機構の構築” からの支援により行われたものである。

## 参考文献

- [1] 党建武, 本多清志, “母音発声時の音声スペクトルに対する梨状窩の影響,” 信学技報, SP 95-10, pp. 1-6, (1995).
- [2] 党建武, 本多清志, “梨状窩 (pyriform fossa) の音声スペクトルへの影響,” 日本音響学会平成 7 年度春期研究発表会講演論文集, pp. 225-226 (1995).
- [3] K. Aoyama, H. Matsuzaki, N. Miki, and Y. Ogawa, “FEM analysis of three-dimensional vocal tract model with branches,” ASA-ASJ 3rd Joint Meeting, 2pSC10, pp. 851-854 (1996).
- [4] 中井孝芳, 河西康仁, 下釜孝裕, 鈴木久喜, “FEM を用いた梨状窩の声門音響特性に与える影響,” 日本音響学会平成 9 年度秋期研究発表会講演論文集, pp. 307-308 (1997).

- [5] 松崎博季, 三木信弘, “放射開口形状および門歯の放射特性に及ぼす影響について,” 日本音響学会平成10年度春期研究発表会講演論文集, pp. 263–264 (1998).
- [6] 佐藤健次, 中井孝芳, “梨状窩と声門上部のある声道内の音圧分布と音響インピーダンス,” 日本音響学会平成10年度秋期研究発表会講演論文集, pp. 263–264 (1998).
- [7] 神山直久, 三木信弘, 永井信夫, “粘弾性体モデルを用いた声道壁インピーダンスについての考察,” 信学論(A), **J75-A**, pp. 1649–1656 (1992).
- [8] 神山直久, “音声生成過程における音響特徴量抽出と実体的声道モデルに関する研究,” 北海道大学学位論文, 第6章, pp. 66–86 (1993).
- [9] H. Matsuzaki, N. Miki and Y. Ogawa, “FEM analysis of sound wave propagation in the vocal tract with 3-D radiational model,” *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, **17**, 3, pp. 163–166 (1996).
- [10] J. Lyzenga and J.W. Horst. “Frequency discrimination of bandlimited harmonic complexes related to vowel formants,” *Journal of the Acoustical Society of America*, **98**, pp. 1943–1955 (1995).
- [11] 松崎博季, 元木邦俊, 三木信弘, “3次元有限要素法による分岐および口唇形状を考慮した声道モデルの音響解析,” 日本音響学会平成15年度春期研究発表会講演論文集, pp. 285–286 (2003).
- [12] K. Motoki, N. Miki and N. Nagai, “Measurement of radiation characteristics using replicas of the lips,” *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, **9**, 3, pp. 123–130 (1988).
- [13] P. Badin, K. Motoki, N. Miki, D. Ritterhaus and M.-T. Lallouache, “Some geometric and acoustic properties of the lip horn,” *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, **15**, 4, pp. 243–253 (1994).